

УДК: 621.924

Румбешта В.А., д.т.н., Гнатейко Н.В., к.т.н., Штефан Н.И., к.т.н.  
НТУУ «Киевский политехнический институт» г.Киев, Украина

## ВИБРОДИНАМИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ МЕХАНООБРАБОТКЕ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ДЕТАЛИ ПРИ ТОЧЕНИИ

Rumbeshta V., Gnateiko N., Shtefan N.  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ([nonna.gnateiko@gmail.com](mailto:nonna.gnateiko@gmail.com))

### SOURCES DYNAMIC OF TECHNOLOGICAL SYSTEM FOR MACHINING AND ITS IMPACT ON DETAILS QUALITY WHEN TURNING

*В работе исследуются причины возникновения динамических колебательных процессов в обрабатывающей системе на примере токарной механообработки. Выявляются причины динамики самого процесса точения деталей в виде изменения параметров стружкообразования из-за погрешностей изготовления заготовки на предыдущих операциях, изменения прочности заготовки от физико-термических процессов изготовления заготовки и ее смещения при установке и закреплении. В статье приводятся результаты анализа вибродинамических режимов при точении металла, их моделирования и степени влияния на качественные характеристики механообработки. Ставится задача исследовать только так называемую группу динамических погрешностей при точении, вызываемых динамикой обрабатывающей системы, проявляющейся в виде виброколебательных процессов.*

Ключевые слова: динамика, механообработка

#### Введение

На качество процесса механической обработки оказывает значительное влияние возникающие при этом в технологической обрабатывающей системе динамические явления различной природы и интенсивности в виде колебательных процессов ее элементов. Выявляются причины динамики самого процесса точения деталей в виде изменения параметров стружкообразования из-за погрешностей изготовления заготовки на предыдущих операциях, изменения прочности заготовки от физико-термических процессов изготовления заготовки и ее смещения при установке и закреплении. Анализируется реакция обрабатывающей системы - станка на динамику резания и появления в результате вторичного динамического фронта в самой упругой, многоэлементной, механической системе станка и возникающие при этом погрешности обработки от указанных выше причин.

#### Цель

Геометрическая точность деталей при механообработке формируется заранее заданной траекторией движения инструмента вдоль обрабатываемой поверхности детали и целым рядом технологических причин, всегда сопровождающих все виды механической обработки. Уровень точности обработки или величина общей суммарной погрешности, как известно, определяется целым рядом возмущающих производственных факторов, всегда сопровождающих данный процесс и вызывающих множество систематических и случайных отклонений.

В задачи данной статьи не входит исследование и анализ всех погрешностей механообработки. Ставится задача исследовать только так называемую группу динамических погрешностей при точении, вызываемых динамикой обрабатывающей системы, проявляющейся в виде виброколебательных процессов.

На основании проведенного многими исследователями анализа причин возникновения динамических режимов во всех элементах обрабатывающей системы было установлено, что такими возбудителями динамики являются три группы причин.

Первым и главным возбудителем динамики ТОС является процесс резания с его переменной по величине силой резания, где основными причинами её изменения являются ряд параметров резания, периодическое меняющих своё значение. К ним можно отнести периодическое изменение величины срезаемого припуска, периодичность стружкообразования; квазипериодическое, релаксационное изменение сил трения в зоне контакта инструмента и детали; периодичность срыва наростообразования на передней поверхности инструмента, анизотропия прочности и твердости обрабатываемой поверхности детали и т. д.

Вторым источником динамического возмущения ТОС при работе являются кинематические внешние факторы, основные из которых такие внешние воздействия соседнего оборудования, вибрация главного электропровода, кинематическая не плавность хода зубчатых передач станка и др.

Третьим и важным источником динамической неустойчивости обрабатывающей системы являются упругие колебания элементов ТОС, возбуждаемые в упругой, маложесткой системе станка первыми двумя источниками в виде автоколебательного процесса.

В упругой, легко динамически возбуждаемой ТОС, имеющей условно - разомкнутую, подвижную силовую связь в виде динамического процесса резания в зоне взаимодействия инструмента и детали. Любое силовое периодическое возмущение вызывает динамический режим в виде упруго-колебательного процесса в многомассовой системе оборудования, приводящих к колебательным смещениям инструмента относительно обрабатываемой детали, которые образуют геометрические погрешности обработки детали, называемые условно динамическими погрешностями формирования её поверхности.

Необходимо отметить, что связующим звеном в упругой, динамической цепочке - станок, приспособление, инструмент и деталь, является динамически малоустойчивый процесс резания, который представляют в виде динамического оператора, как связующую передаточную функцию. Такую связь между двумя упруго-колеблющимися элементами ТОС и геометрическим формированием обрабатываемой поверхности детали можно представить в виде математической модели:

$$\begin{cases} \ddot{Y}(\tau) - |W_{YCC}(D)| \cdot \ddot{P}_y(\tau) = |W_{YCC}(D)| \cdot \ddot{U}(\tau) + \ddot{G}(\tau) \\ \ddot{P}_y(\tau) = \ddot{F}_\Sigma(\tau) - |W_P(D)| \cdot \ddot{Y}(\tau) \\ \ddot{r}(\tau) = |W_\Phi(D)| \cdot \ddot{Y}(\tau) \end{cases} \quad (1)$$

где:

$\ddot{Y}(\tau)$  - вектор колебательных смещений инструмента относительно детали в нормальном направлении;

$\ddot{U}(\tau)$  - вектор силовых управляющих воздействий;

$\ddot{G}(\tau)$  - вектор не силовых внутренних и внешних возмущений;

$\ddot{r}(\tau)$  - текущий переменный радиус-вектор функции профиля поверхности обрабатываемой детали;

$\ddot{P}_y(\tau)$  - главный, переменный по величине вектор силы резания по нормали к обрабатываемой поверхности;

$\ddot{F}_\Sigma(\tau)$  - вектор общего шума всех сил, действующих в ТОС во время механообработки, как геометрическая сумма сил резания и упруго-инерционных колебаний масс элементов ТОС, сил их упругости и трения, усилий в кинематических цепях передачи движений ит.д.;

$\tau$  - символ, который указывает, что данный параметр переменен по величине;

$|W_{YCC}(D)|$  - динамический оператор упругой системы станка, описывающий динамические характеристики основных его рабочих узлов - шпиндельного и суппортного и их колебаний;

$|W_P(D)|$  - динамический оператор характеристики процесса резания как динамической связи ПМО и ТОС;

$|W_\Phi(D)|$  - динамический оператор процесса формирования обрабатываемой поверхности детали при точении;

$(D) = \frac{d}{d\tau}$  - дифференцирующий оператор по времени.

Составными факторами  $\ddot{G}(\tau)$  являются параметры процесса механической обработки (ПМО), как размерный износ инструмента, температура резания и окружающей среды, коэффициенты трения инструмента и детали и между трущимися элементами ТОС и т.д.

Составляющими  $\ddot{U}(\tau)$  вектора управляющих воздействий - режимы резания, в виде скорости резания  $V$ .

Динамическая передаточная функция  $W_{YCC}(D)$  в операторной форме по Лапласу, как динамичный оператор принято описывать с учетом динамических характеристик станка  $|1|$  в виде функции:

$$W_{YCC}(D) = \frac{dP_y(\tau)}{dY(\tau)} = \frac{\frac{1}{C}}{\frac{M}{C}D^2 + \frac{H}{C}D + 1}, \quad (2)$$

где  $M, H, C$  - соответственно масса, диссипативно-демпфирующие свойства и жесткость системы станка.

Динамический оператор динамики резания, как передаточная функция изменения силы резания от изменения величин глубины резания  $t$ , времени стружкообразования  $T_p$  и размерного износа инструмента по ходу обработки  $h_{\text{и}}$  записывается в виде (3):

$$W_P(D) = \frac{dP_y(\tau)}{d[t; T_p; h_{\text{и}}](\tau)} = \frac{K_p}{T_p(D) + 1} + h_{\text{и}} D \quad (3)$$

где  $K_p$  - коэффициент жесткости резания. При этом экспериментально установлено, что при увеличении износа инструмента  $h_{\text{и}}$  происходит постепенное смещение основного спектра колебаний силы резания в сторону низких частот из-за растущего демпфирования трением.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что формообразование поверхности обработки  $a$ , следовательно, и динамический оператор формообразования  $W_\phi(D)$ , являются частотозависимыми от динамики резания. Так при обработке при небольших оборотах в низкочастотной области колебаний в пределах 150-600 Гц профиль поверхности детали формируется однозначно движением и динамикой инструмента. В более высокой частотной спектральной области, с ростом скорости резания, когда частота колебаний достигает 1000-2000 Гц, большое влияние на формирование профиля поверхности оказывают процессы стружкообразования и трения при резании.

Эти результаты позволяют экспериментально идентифицировать передаточную функцию – оператор  $W_\phi(K_{Tp^\omega})$  процесса формообразования профиля с учетом влияния частотной составляющей в виде:

$$W_\phi(K_{Tp^\omega}) = \frac{1}{(K_T T_{p^\omega} + 1)}, \quad (4)$$

где  $K_T$  - коэффициент учета величины трения инструмента и детали, и геометрии заточки режущего инструмента,  $\omega$  - круговая частота квазипериодического формирования профиля, зависящая от скорости резания. При этом на  $K_T$  естественно будет влиять величина износа режущего инструмента  $h_{\text{и}}(\tau)$  в худшую сторону.

На основе полученной математической модели образования профиля (1) и математического описания динамических операторов (2), (3) и (4) можно получить структурную модель в виде функционально-структурной схемы формирования профиля обработки детали с учетом динамики процесса (рис. 1)

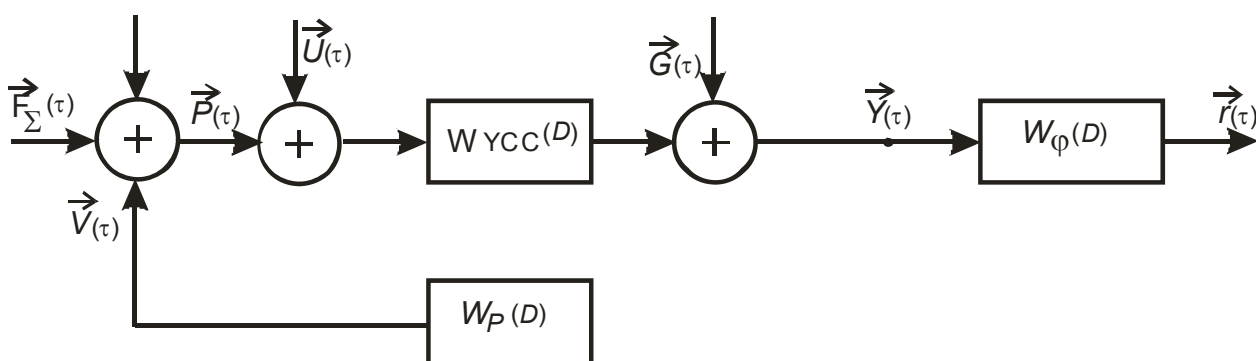


Рис. 1. Функционально-структурная схема формирования динамического качества процесса механообработки

Тогда профиль геометрии получаемой поверхности обработки, как величины  $r(\tau; x)$  переменного радиуса профиля по длине детали  $l$  по оси  $x$  при точении можно описать математической зависимостью:

$$r(\tau; x) = K_{\text{НВ}} \left( \int_0^1 W_\phi(D) \cdot Y(\tau) d\tau + \Delta r(\tau; x) \right) \quad (5)$$

где  $K_{\text{НВ}}$  - коэффициент учета упруго-пластичных и прочностных свойств обрабатываемого материала;  $\Delta r(\tau; x)$  - вторая составляющая динамической погрешности обработки радиуса детали по ее длине, как

результат воздействия самого процесса резания, формируемая более высокими спектрами частотных колебаний при резании по причине фрикционно-релаксационных процессов трения резца по детали, вызывающая волнистость ее поверхности.

Такую динамическую погрешность формообразования можно получить в виде уравнения

$$\Delta r(\tau; x) = \frac{W_p(D)}{1 + \left( \frac{K_p}{T_p(D) + 1} + h_n D \right)} K_p(\tau) + \Delta y(\tau) \quad (6)$$

где  $K_p(\tau)$  - коэффициент жесткости резания, который при износе инструмента меняется по величине;

$\Delta y(\tau)$  - случайная составляющая процесса обработки точением от влияния геометрии поверхности заготовки, внешних возбудителей вибрации.

### Выводы по полученным результатам

Анализ полученных результатов по исследованию динамики процесса механообработки точением и её влияние на качество обработки деталей позволяет сделать следующие выводы:

1. При черновом и получистовом точении, когда скорость обработки низка, на точность получаемой геометрии поверхности детали в основном влияет низкочастотный спектр динамических колебаний ТОО, кратный частоте вращения заготовки, формируемый погрешностями припуска  $\Delta t$  и анизотропией прочности поверхности  $\Delta H_V$ , а шероховатость получаемой поверхности определяется в основном пластическими разрушениями поверхностного слоя детали.

2. При значительных скоростях обработки, что имеет место при чистовом точении динамику процесса резания, начинает формировать такой возбудитель колебаний, как периодичность стружкообразования  $T_p$  со своей частотой  $\varphi_0 = f(V_{рез})$ , что хорошо исследовал И.А. Тимме, когда частота динамических колебаний повышается до 1500-2000 Гц, а амплитуда смещений значительно уменьшается. Это оказывает положительное влияние на формирование чистоты обрабатываемой поверхности, на что уже в основном влияет релаксационный процесс трения инструмента по детали.

3. При скоростной обработке точением  $V_{рез} = 4...5$  и более м/с) основной динамический фронт колебаний ТОО смещается в зону высоких частот в 6..8 КГц, геометрия точности профиля детали по сечению под влиянием  $\Delta t$  и  $\Delta H_V$ , при этом значительно улучшается, а профиль шероховатости поверхности уже формируется динамикой резания от разрушения кристаллической решетки материала детали. При этом исчезает влияние релаксации при трении инструмента о деталь из-за появления в зоне их контакта полностью пластически разрушенного жидко-вязкого слоя при обработке сталей по причине большой концентрации тепла и напряжений, а шероховатость поверхности по величине становится почти линейно зависимой от  $V_{рез}$ .

4. Для получения необходимого качества обработанной поверхности при обработке резанием желательно применять специальную систему автоматического управления динамикой ТОО при работе, основанной на вибродиагностике обрабатываемой системы и её стабилизации в поисковом, адаптивном режиме [2-4].

**Анотація.** У роботі досліджуються причини виникнення динамічних коливальних процесів в обробній системі на прикладі токарної механообробки. Виявляються причини динаміки самого процесу точіння деталей у вигляді зміни параметрів стружкоутворення через похибки виготовлення заготовки на попередніх операціях, зміни міцності заготовки від фізико-термічних процесів виготовлення заготовки і її зміцнення при установці і закріпленні. В статті наводяться результати аналізу вібродинамічних режимів при точінні металу, їх моделювання та ступені впливу на якісні характеристики механообробки. Ставиться завдання досліджувати тільки так звану групу динамічних похибок при точінні, що викликаються динамікою обробної системи, що виявляється у вигляді віброколивальних процесів.

**Ключові слова:** динаміка, механообробка.

**Abstract.** This paper investigates the causes of dynamic oscillatory processes in the manufacturing system on the example of turning machining. The reasons of the dynamics of the process of turning parts in the form of changing parameters of chip due to manufacturing errors procurement previous operations, changes in strength of the workpiece on the physical and thermal processes for manufacturing a preform and offset when installing and fixing. In article describes the results of the analysis vibrations dynamics models in turning metals, them of modeling and of degrees influences for the characteristic quality machining working. In the scope of this article does not include research and analysis of all machining errors. Analyzes the response processing system - cutting

*machine dynamics and appearance due to a secondary front in the most dynamic elastic, multi-element, mechanical system of the machine and the error arising from this treatment of the above reasons. This article provides only investigation of so-called group of dynamic errors in turning caused by the dynamics of the manufacturing system, which is manifested in the form of vibration oscillatory processes. On the basis of many researchers analyze the causes of dynamic modes in all elements of the manufacturing system was established that the dynamics of such pathogens are three reason groups: cutting process, kinematic external factors, elastic elements vibration.*

Keywords: dynamics.

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. Кудинов В.А. Динамика станков – М.: Машиностроение, 1967.-360с.
2. Гнатейко Н.В., Румбешта В. О. Методика керування динамікою оброблювальної механічної системи. / Наукові вісті НТУУ «КПІ», №6, 2002.- с. 55÷58.
3. Гнатейко Н. В., Румбешта В.О. Підвищення якості процесу точіння за рахунок стабілізації оброблювальної системи / Вісті академії інженерних наук України, №3,-К.: НТУУ «КПІ», 2002.- с. 35÷37.
4. Гнатейко Н.В., Румбешта В.О., Никитчук Е.А. Повышение качества процесса механообработки путем стабилизации динамики ТОС /Вісник НТУУ«КПІ», серія «Приладобудування» №31, НТУУ«КПІ», - 2006.- с. 112÷120

#### References

1. Kudinov V.A. Dinamika stankov [Dynamics of machines]. Moskow. Mashinostroenie, 1967, 60p.
2. Gnatejko N.V., Rumbeshta V. O. Metodika keruvannja dinamikoju obroblyval'noї mehanichnoї sistemi. Naukovi visti NTUU «KPI», no 6, 2002. p. 55÷58.
3. Gnatejko N. V., Rumbeshta V.O. Pidvishhennja jakosti procesu tochinnja za rahunok stabilizacii obroblyval'noї sistemi. Visti akademii inzhenernih nauk Ukraїni, No 3, Kyiv. NTUU «KPI», 2002. p. 35÷37.
4. Gnatejko N.V., Rumbeshta V.O., Nikitchuk E.A. Povyshenie kachestva processa mehanoobrabotki putem stabilizacii dinamiki TOS. Visnik NTUU«KPI», serija «Priladobuduvannja» No 31, NTUU«KPI», 2006. p. 112÷120

Подана до редакції 23.04.2014